

SiO₂ 含量对铜基摩擦材料摩擦行为的影响

韩晓明, 符 蓉, 高 飞, 宋宝韞, 农万华

(大连交通大学 轨道交通关键材料实验室, 大连 116028)

摘 要: 采用粉末冶金技术制备铜-石墨-SiO₂ 烧结材料, 利用销盘式摩擦试验机, 在摩擦速度为 7.8~47.1 m/s 的范围内, 研究 SiO₂ 在不同摩擦速度条件下的损伤机理及其与材料性能的关系。结果表明: SiO₂ 对材料摩擦磨损性能的影响与摩擦速度密切相关; 低摩擦速度条件下, SiO₂ 含量的变化对提高摩擦因数的作用明显, 原因在于摩擦力的静载荷性质有利于发挥 SiO₂ 粒子的犁沟作用而增加摩擦力; 材料的磨损率对 SiO₂ 含量不敏感; 高摩擦速度条件下, 具有冲击作用的摩擦载荷导致 SiO₂ 粒子粉碎性破碎, 破碎的 SiO₂ 粒子弥散嵌入高温软化的基体中而弱化了犁沟作用, 导致摩擦因数对 SiO₂ 含量的变化不敏感; 弥散分布的 SiO₂ 粒子强化基体表面强度, 导致其磨损率随 SiO₂ 含量的增加而降低。

关键词: 铜基摩擦材料; SiO₂; 摩擦行为; 第三体

中图分类号: TF 125; TH 117.3

文献标识码: A

删除的内容: 了

Effects of content of SiO₂ particles on tribological behavior of Cu-matrix friction materials

HAN Xiao-ming, FU Rong, GAO Fei, SONG Bao-yun, NONG Wan-hua

(Key Materials Laboratory for Railway, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: To investigate the relationship between dandification mechanism of SiO₂ particles and materials performance under different friction speeds, Cu-graphite-SiO₂ sintered materials were prepared through powder metallurgy. The tests were conducted on a pin-on-disk tester in speed range of 7.8~47.1 m/s. The results demonstrate that the effects of SiO₂ on the friction and wear performance of the materials are closely related to the friction speed. At low friction speed, the friction coefficient increases with increasing content of SiO₂ particles, this is attributed to the effect of SiO₂ scratch, which can improve the friction force remarkably under static load. However, the wear rate is not sensitive to the content of SiO₂ particles. At high friction speed, the SiO₂ particles are broken by impact action and embedded in the matrix softened at high temperature, which results in reduction of scratch influence, and makes the friction coefficient insensitive to SiO₂ content. The increase of surface hardness causes the wear rate to fall with increasing content of SiO₂ particles.

Key words: Cu-matrix friction material; SiO₂; tribological behavior; third body

删除的内容: ,

删除的内容:

删除的内容: ,

删除的内容: ,

删除的内容: ,

铜基摩擦材料以其优良的摩擦性能在高速列车制动方面取得广泛应用^[1-2]。摩擦材料中的组分根据其在材料中的作用,分为基体组元、摩擦组元和润滑组元。摩擦组元用以调整摩擦因数,起到增摩、抗磨和抗粘结的作用。摩擦组元一般为 SiO₂、Al₂O₃、SiC 和一些

金属氧化物和氮化物等,利用其高硬度和高粗糙度的硬质点犁削对偶而增加摩擦力^[3-7],其含量和粒度的变化在很大程度上影响着材料的摩擦磨损性能^[8]。摩擦组元含量增加,有利于摩擦因数增加^[3,6-8],但过量硬质颗粒容易降低基体夹持能力^[9-10],对提高材料的整

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA03Z515); 国家自然科学基金资助项目(50375025)

收稿日期: 2008-08-23; 修订日期: 2008-12-25

通信作者: 高 飞, 教授; 电话: 0411-84109429; E-mail: gaofei@djtu.edu.cn

体强度是不利的。可见, 摩擦组元对材料摩擦性能的影响是多方面的。另一方面, 这类硬质颗粒强化摩擦材料通常应用在干摩擦条件下。干摩擦条件的特点在于摩擦面上存留大量磨损颗粒, 这部分组织被称为第三体。第三体的行为及其对材料摩擦磨损性能的影响同样引起人们的注意^[11-13]。然而, 在材料中含有 SiO₂ 颗粒的情况下, 随摩擦速度的不同, SiO₂ 颗粒对材料的摩擦磨损性能的影响程度也不同, 目前人们对 SiO₂ 颗粒在不同速度条件下的摩擦学行为及其对摩擦磨损性能的影响理解有限。因此, 研究材料中 SiO₂ 与第三体的关系及在不同摩擦速度条件下表现出的摩擦学行为对制备高性能的铜基摩擦材料具有重要意义。

本文作者针对铜基粉末冶金材料, 在定速摩擦条件下, 试验研究多种摩擦速度条件下 SiO₂ 的摩擦学特征及其与摩擦摩擦磨损性能的关系, 并考虑第三体与 SiO₂ 颗粒的相互作用。

1 实验

采用粉末冶金工艺制备 Cu-graphite-SiO₂ 烧结材料, 试验材料由电解铜粉(300 μm)、石墨和 SiO₂(颗粒粒度 300~600 μm)构成 3 种组分的配比(质量分数)为: 石墨 10.0%, SiO₂ 3.0%~12.0%, 余量 Cu。粉末经均匀混合, 在压制压力为 600 MPa 条件下压制成型, 在钟罩式烧结炉中加压烧结, 烧结压力为 1.77 MPa, 烧结温度为 820 , 保温时间为 1.5 h。制备的试样尺寸为 $d17\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。

摩擦磨损试验在销盘式摩擦机上进行(见图 1), 对偶盘为 H13, 摩擦半径为 150 mm, 摩擦压力为 0.5 MPa, 转动速度为 200~3 000 r/min(摩擦线速度为 7.8~47.1 m/s), 每种速度条件下的摩擦时间为 30~60 s。

温度测量方式为在试样中心钻 $d3\text{ mm}$ 孔, 将热电偶插入孔中, 热电偶距摩擦接触表面 3~4 mm。表面

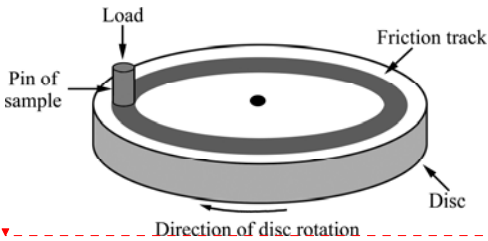


图 1 销盘式摩擦机示意图

Fig.1 Schematic diagram of pin-on-disk tester

形貌观察采用 OLYMPUS 数码成像显微镜和 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜。

2 结果与分析

2.1 SiO₂ 颗粒对摩擦因数的影响

为考察摩擦过程中 SiO₂ 粒子在表面的作用, 将所研究材料与 Cu-graphite 材料^[14]和 Cu-SiO₂ 材料^[3]摩擦磨损性能进行比较。3 种材料成分及组成如表 1 所列 3 种材料摩擦磨损性能试验条件相同。图 2 所示为摩擦速度对摩擦因数的影响。由图 2 可知, 从总体趋势上看, Cu-SiO₂ 和 Cu-graphite-SiO₂ 材料摩擦因数都随着摩擦速度的提高而下降, Cu-graphite 材料的摩擦因数随摩擦速度提高变化不大。在摩擦速度超过 1000 r/min 时 3 种材料的摩擦因数趋于稳定。对于加入 SiO₂ 的两种铜基摩擦材料来说, 其摩擦因数在低速阶段要比在高速阶段高很多, 且远远高于 Cu-graphite 材料。而 Cu-SiO₂ 材料与 Cu-graphite-SiO₂ 材料相比, 其摩擦因数要略高。由此可见, 在高速条件下, 无论是石墨还是 SiO₂ 对材料的摩擦因数的影响程度都是有限的。同时, 在低速条件下, SiO₂ 体现出增加摩擦因数的特性, 而石墨起到降低摩擦因数的作用。

表 1 材料组成

Table 1 Compositions of materials (mass fraction, %)

Sample	Cu	SiO ₂	Graphite
Cu-graphite ^[14]	90.0	—	10.0
Cu-SiO ₂ ^[3]	94.0	6.0	—
Cu-SiO ₂ -graphite	84.0	6.0	10.0

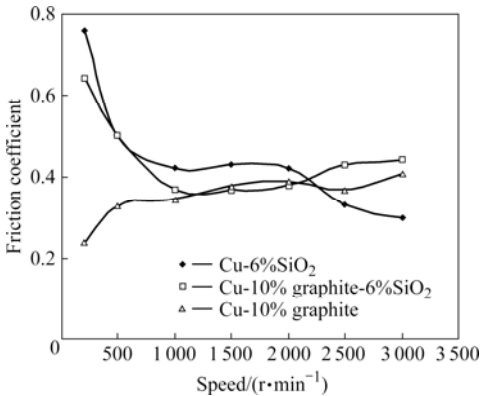


图 2 摩擦速度对摩擦因数影响

Fig.2 Effect of friction speed on friction coefficient

删除的内容: 了

删除的内容: 的

删除的内容: 在这方面,

删除的内容: 石墨

删除的内容: 的

删除的内容:

删除的内容: 石墨

删除的内容: 石墨

删除的内容: 石墨

删除的内容: 石墨

删除的内容:

保温时间 1.5h。制备的试样尺寸为 $\Phi 17\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。

图 3 所示为 Cu-graphite-SiO₂ 材料中 SiO₂ 含量对摩擦因数的影响。由图 3 可见, 随 SiO₂ 含量增加, 摩擦因数总体表现出升高趋势。同时, SiO₂ 含量对材料摩擦因数的影响与摩擦速度有关。当摩擦速度较低时, SiO₂ 含量增加, 摩擦因数增加明显; 随着摩擦速度提高, SiO₂ 含量增加, 摩擦因数变化范围减小。当摩擦速度达到 3 000 r/min 时, 随 SiO₂ 含量增加, 摩擦因数变化不明显。

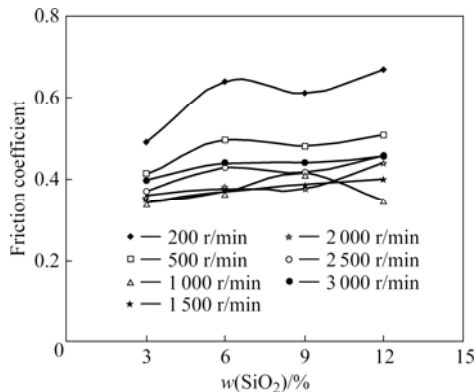


图 3 SiO₂ 含量对摩擦因数影响

Fig.3 Effect of SiO₂ content on friction coefficient

从理论上来说, 摩擦力源自摩擦副表面接触点上机械啮合作用和分子吸引作用所产生的剪切阻力的总和。SiO₂ 为高硬度质点, 对摩擦因数的影响在于产生犁削作用而增加机械啮合力。SiO₂ 含量增加, 有利于增加机械啮合力而提高摩擦因数, 然而由图 2 可知, SiO₂ 这部分的作用主要体现在低摩擦速度条件下。这说明 SiO₂ 在摩擦表面的力学行为随摩擦速度不同而有所不同。

图 4 所示分别为摩擦速度为 200 和 3 000 r/min 条件下摩擦表面 SiO₂ 颗粒的形貌特征。由图 4 可见, 在摩擦速度为 200 r/min 时, SiO₂ 颗粒破裂程度小, 容易观察到在 SiO₂ 颗粒周围富集大量微细粉末(第三体)(见图 4(a)), 这表明 SiO₂ 颗粒的损耗呈现较大幅度的逐渐磨损过程; 在摩擦速度为 3 000 r/min 情况下, SiO₂ 颗粒呈完全破碎状, 破碎后的颗粒再次嵌入基体中(见图 4(b)), 这表明 SiO₂ 主要处于一种粉碎性的损伤过程。比较这两种摩擦速度条件下 SiO₂ 颗粒破裂程度可知, 摩擦速度不同时摩擦表面 SiO₂ 颗粒的损伤方式是有区别的, 因此, 材料会表现出不同的摩擦学行为。在低速摩擦条件下, 摩擦对偶间的作用力近似静载荷, 力的作用点往往是高硬度的 SiO₂ 颗粒构成的微凸体, 因此, 摩擦力很大程度取决于与 SiO₂ 颗粒微凸



图 4 在摩擦速度 200 r/min 和 3 000 r/min 条件下 SiO₂ 颗粒的形貌

Fig.4 Morphologies of SiO₂ particles at friction speeds of 200 r/min (a) and 3 000 r/min (b)

体啮合的面积和强度。SiO₂ 含量增加, 硬质点微凸体数量增加, 犁沟力增大, 从而表现出较高的摩擦因数。同时, 在犁削的过程中, SiO₂ 颗粒经历了一个逐渐损伤过程。在高速摩擦条件下, 摩擦面微凸体间的作用力具有较强的冲击载荷性质, 导致摩擦表面 SiO₂ 粒子成粉碎性破裂, 破碎的 SiO₂ 颗粒容易嵌入铜基体中, 并在表面弥散分布, 相当于增加了表面 SiO₂ 颗粒数量, 使得低 SiO₂ 含量材料由于摩擦表面嵌入较多的 SiO₂ 颗粒而同样表现出高的摩擦因数。而高速条件下 SiO₂ 含量的改变对摩擦因数的影响程度减弱。由图 3 可见, 随着摩擦速度的提高, 摩擦因数降低, 这可从 SiO₂ 颗粒在表面的行为来解释, 即破碎的 SiO₂ 颗粒嵌入基体的过程存在一个 SiO₂ 颗粒型面与摩擦面的平顺过程, 使 SiO₂ 颗粒型面与摩擦面处于同一个平面而起到降低 SiO₂ 颗粒锐度的作用, 同时, 基体金属的高温软化降低了对 SiO₂ 颗粒的夹持能力, 这两种因素均降低了 SiO₂ 颗粒的犁沟效果, 削弱了 SiO₂ 含量增加引起摩擦因数增高的作用, 因此, 在高速条件下 SiO₂ 含量的改变对摩擦因数的影响程度减弱。

2.2 SiO₂ 颗粒对材料耐磨性的影响

图 5 所示为不同摩擦速度条件下, 摩擦速度对材

删除的内容: <sp>

删除的内容: 石墨

删除的内容: ,

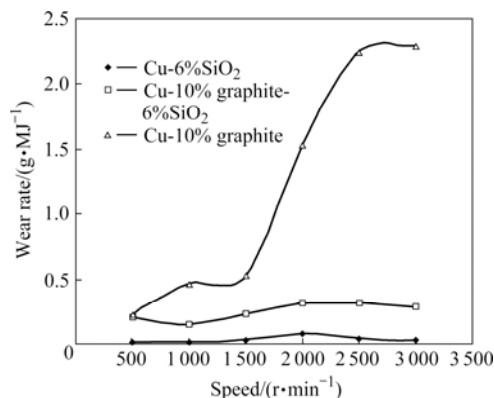


图5 摩擦速度对磨损率的影响

Fig.5 Effect of friction speed on wear rate

料磨损率的影响。从图 5 中可以看出, 加入 SiO₂ 的两种铜基摩擦材料在各个摩擦速度条件下的磨损率都很低, 并且 Cu-SiO₂ 材料与 Cu-graphite-SiO₂ 材料相比, 前者磨损率要更低; 而不加 SiO₂ 的 Cu-graphite 材料在较低摩擦速度时的磨损率较小, 随着摩擦速度增加, 磨损率明显增加。由此可知, 摩擦材料的磨损率的变化受材料成分的影响。

图 6 所示为摩擦速度 3 000 r/min 时, 两种材料的表面形貌。由图 6 可见, 在材料中不含 SiO₂ 的情况下, 摩擦表面粗糙, 容易形成大量深且宽的犁沟(见图 6(a)); 当材料中含 SiO₂ 时, 摩擦表面相对平滑, 一层连续致密的第三体覆盖在表面(见图 6(b))。因此, 材料组分的不同对表面状态产生明显的影响, 从而导致磨损量的不同。SiO₂ 颗粒的存在起到硬质点的强化作用, 一方面提高了摩擦表面强度, 另一方面有利于磨损粒子存留在摩擦表面, 使摩擦表面形成一层较致密的第三体保护层, 这两方面的因素均有助于提高材料在高速摩擦条件下的耐磨性。

图 7 所示为在摩擦速度 200 r/min 条件下摩擦时间对摩擦表面的 SiO₂ 颗粒的影响。由图 7 可见, 随摩擦时间的增加, 摩擦表面 SiO₂ 颗粒的形状和周围的状态均发生一定程度的变化。在摩擦初期, SiO₂ 颗粒周围形成深色斑带, 当摩擦超过一定时间, SiO₂ 颗粒颜色变化不明显, 而周围组织的颜色趋向一致。这表明, 在摩擦过程中 SiO₂ 颗粒起到硬质点的承载作用。在摩擦初期, SiO₂ 颗粒与基体铜具有相同的接触啮合几率, 然而, SiO₂ 颗粒的硬度和强度远高于铜, 因此, 在摩擦力的作用下, 铜微凸体容易发生剪切变形而损伤, 而高硬度的 SiO₂ 颗粒微凸体与对偶钢盘相作用产生

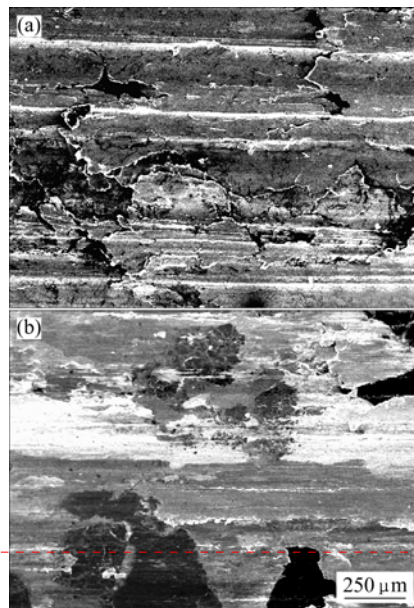


图6 摩擦速度为 3 000 r/min 时两种材料的摩擦表面形貌

Fig.6 Morphologies of worn surfaces of two kinds of materials at friction speed of 3 000 r/min: (a) Cu-10% graphite; (b) Cu-6%SiO₂-10% graphite

删除的内容: 可见, 材料的成分对磨损率有影响,

删除的内容: 石墨

图7 摩擦时间对摩擦表面 SiO₂ 颗粒的影响Fig.7 Effects of friction time on morphology of SiO₂ particles of worn surface (6%SiO₂): (a) 2 s; (b) 124 s

删除的内容: 可见

删除的内容: 明显

犁削现象,对偶盘被损伤而形成磨屑;被犁削下的钢盘磨屑转移到 SiO_2 颗粒周围,使 SiO_2 颗粒附近形成富铁区,从而表现出深色的斑带。随 SiO_2 颗粒承载面积的增加,当犁削力达到破碎强度时, SiO_2 颗粒发生局部碎裂而使 SiO_2 颗粒形状发生变化。同时,随摩擦时间的增加,大量的磨屑充分混合,各区域的表面成分趋于均匀,从而在颜色上不再存在差别。

摩擦表面 SiO_2 颗粒随着摩擦时间的这种变化情况表明, SiO_2 颗粒在摩擦过程中起到了提高承载力和耐磨性的作用,因此,有利于降低磨损率。

图 8 所示为 Cu-graphite-SiO_2 材料中, SiO_2 含量对磨损率影响。由图 8 可知,从总体趋势看,材料的磨损率随着 SiO_2 含量增加而降低,同时, SiO_2 含量对材料磨损率影响与摩擦速度有关。当摩擦速度较低时, SiO_2 含量增加,磨损率无明显变化,随着摩擦速度提高, SiO_2 含量增加,磨损率下降幅度明显。

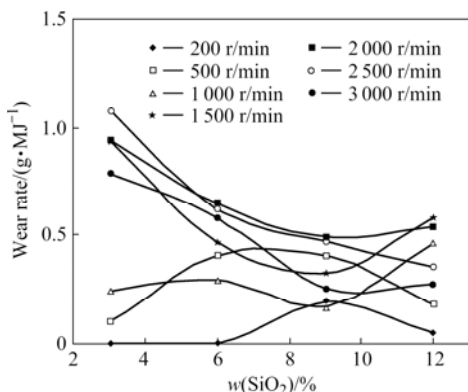


图 8 不同摩擦速度时 SiO_2 含量对磨损率影响

Fig.8 Effects of SiO_2 contents on wear rate of Cu-graphite-SiO_2 material at different friction speeds

由摩擦表面组织状态的变化情况可知(见图 7),在低速摩擦条件下,磨损程度取决 SiO_2 颗粒的破损和参与啮合的 SiO_2 的数量。低速摩擦条件下摩擦力的静载荷性质容易产生 SiO_2 颗粒的渐进性损耗(见图 4(a)), SiO_2 含量的增加可以增加表面 SiO_2 的数量,但处于啮合状态的 SiO_2 的损伤程度不一定随表面 SiO_2 数量的增加而减少,因此,磨损量并没表现出随 SiO_2 的提高而降低。在高摩擦速度条件下, SiO_2 颗粒的增加有利于降低磨损率,其原因有两方面:一是高速摩擦形成的冲击载荷作用使表面 SiO_2 产生粉碎性破坏,破碎的 SiO_2 颗粒弥散分布在摩擦表面,起到了增强摩擦面强度和材料抗犁削能力的作用(见图 4(b));二是 SiO_2

颗粒起到钉扎第三体的作用,有利于高速摩擦形成的大量第三体存留在表面(图 9),形成一层连续致密的第三体层^[3,9](图 6(b)),起到对摩擦表面的保护作用。同时,在高速摩擦造成金属基体软化的条件下, SiO_2 颗粒对表面的强化作用可降低材料的磨损率,因此,随着 SiO_2 含量增加,磨损率降低(图 8)。

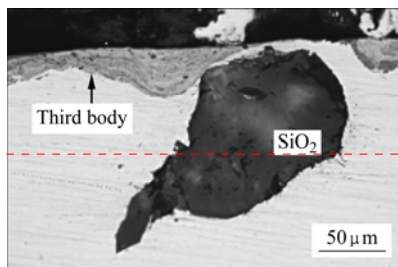


图 9 SiO_2 对第三体的钉扎

Fig.9 Third bodies hindered by SiO_2 particle

2.3 SiO_2 对摩擦面温度的影响

图 10 所示为不同摩擦速度条件下, SiO_2 含量对材料摩擦表面温度的影响。由图 10 可见,随着 SiO_2 含量增加,摩擦表面温度升高,且温度升高的速度随 SiO_2 含量增加而增加。

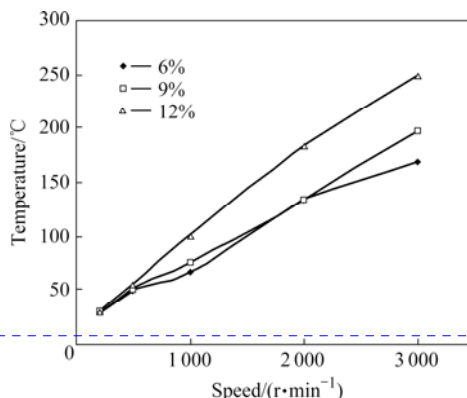


图 10 不同摩擦速度时 SiO_2 含量对摩擦表面温度影响

Fig.10 Effects of SiO_2 contents on temperature of friction surface at different friction speeds

材料摩擦表面温度随 SiO_2 含量增加而升高的原因有:一方面 SiO_2 为非金属材料,其导热性能低,其含量增加,材料导热性能下降,导致温度升高^[15];另一方面 SiO_2 含量增加造成摩擦功率增加而导致热量增加。这两方面的因素均随摩擦速度的提高而表现明显。

删除的内容: 石墨

删除的内容: <sp>

删除的内容: 的因素

3 结论

1) 摩擦材料中 SiO₂ 提高摩擦因数的作用与摩擦速度有关,在低摩擦速度条件下, SiO₂ 提高摩擦因数的作用明显。原因在于摩擦力的静载荷性质使 SiO₂ 颗粒主要通过犁沟作用增加摩擦阻力;在高摩擦速度条件下,冲击性载荷造成 SiO₂ 颗粒粉碎性破坏,使表面 SiO₂ 含量增加而降低了摩擦因数的变化程度。

2) SiO₂ 可改善材料的耐磨性,低摩擦速度条件, SiO₂ 含量增加,磨损率变化不明显,原因在于静载荷性质的摩擦力对 SiO₂ 质点的损伤程度与 SiO₂ 的含量相关性不强;高速摩擦条件下, SiO₂ 颗粒弥散分布在表面而有利于强化摩擦面和减少第三体的流失,起到了降低材料磨损率的作用。

REFERENCES

- [1] RAISON J. Les materiaux de freinage[J]. Revue Generale des Chemins de Fer, 1991, 110(7/8): 27-36. (in Franch)
- [2] COPIN R. Braking tests on a reduced-scale test bench with a disc-pad couple used on the TGV-PBKA[C]// Proceedings of JEF 1998, Lille, 1998: 141-150.
- [3] 符 蓉, 宋宝钊, 高 飞, 徐振越. Cu-SiO₂ 烧结材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(4): 377-381.
- FU Rong, SONG Bao-yun, GAO Fei, XU Zhen-yue. Study on the friction and wear properties of sintered Cu-SiO₂ composites [J]. Tribology, 2007, 27(4): 377-381.
- [4] SINGH M, MONDAL D P. Effect of sillimanite particle reinforcement on dry sliding wear behaviour of aluminium alloy composite[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19: 303-312.
- [5] KORKUT M H. Effect of particulate reinforcement on wear behaviour of aluminium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20: 73-8.
- [6] 李月英, 刘勇兵, 曹占义, 杨 杰. Al₂O₃-SiO₂ 颗粒增强铝基复合材料的摩擦磨损特性[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(2): 140-143.
- LI Yue-ying, LIU Yong-bing, CAO Zhan-yi, YANG Jie. Friction and wear behavior of Al₂O₃-SiO₂ particle reinforced Al matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2003, 11(2): 140-143.
- [7] 刘德宝, 崔春翔. 氮化物陶瓷颗粒增强铜基复合材料的干摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 54-59.
- LIU De-bao, CUI Chun-xiang. Study on dry friction and wear properties of copper-matrix composites reinforced with nitrides ceramics particles[J]. Tribology, 2006, 26(1): 54-59.
- [8] 戈晓岚, 许晓静, 蔡 兰, 陈康敏, 居志兰. SiC_p 含量和尺寸对 Al 基复合材料摩擦学特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 458-462.
- GE Xiao-lan, XU Xiao-jing, CAI Lan, CHEN Kang-min, JU Zhi-lan. Effect of grain size and content of SiC_p on tribology characterization of SiC_p/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 458-462.
- [9] 姚萍屏, 熊 翔, 李世鹏. Fe 及 SiO₂ 对铜基刹车材料摩擦磨损性能的影响机制[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(5): 478-483.
- YAO Ping-ping, XIONG Xiang, LI Shi-peng. Friction and wear behavior and mechanism of Fe and SiO₂ in Cu-based P/M friction material[J]. Tribology, 2006, 26(5): 478-483.
- [10] 白同庆, 佟林松, 李东生. SiO₂ 和莫来石对铜基摩擦材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2006, 24(2): 114-117.
- BAI Tong-qing, TONG Lin-song, LI Dong-sheng. The effects of SiO₂ and mullite on the properties of copper-based friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006, 24(2): 114-117.
- [11] ERIKSSON M. Tribological surface of organic brake pads[J]. Tribology International, 2000, 33: 817-827.
- [12] SINGER I L, DAVID S, KATHRYN D. Investigation of third body progress by in vivo Raman tribology[C]// Conference Proceeding of Nord Trib, Porvo, Finland, 2000: 1-12.
- [13] BERTHIER Y, DESCARTES S. The role and effects of the third body in the wheel-rail interaction[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 2004, 27: 423-436.
- [14] 高 飞, 杜素强, 符 蓉, 宋宝钊. 不同速度下石墨含量对铜基摩擦材料性能的影响[J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 80-82.
- GAO Fei, DU Su-qiang, FU Rong, SONG Bao-yun. Effects of graphite content on performance of copper-based friction materials[J]. Mining Metallurgical Engineering, 2005, 25(4): 80-82.
- [15] 樊 毅, 张金生, 高 游, 吴 芳, 刘伯威. 石墨粒度对 Cu-Fe 基摩擦材料性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 475-477.
- FAN Yi, ZHANG Jin-sheng, GAO You, WU Fang, LIU Bo-wei. The influence of graphite particle size on friction and wear properties of copper-ferrous matrix friction materials[J]. Tribology, 2000, 20(6): 475-477.

(编辑 何学锋)

删除的内容: ,

删除的内容: [1]

删除的内容: , ..., [2]

带格式的: 项目符号和编号

删除的内容: , ..., [3]

删除的内容: , ..., [4]

删除的内容: ,

删除的内容: , ..., [5]

删除的内容: ,

删除的内容: ,

删除的内容:) :

删除的内容: [6]

删除的内容:

删除的内容: , ..., [7]

删除的内容: , ..., [8]

删除的内容:

删除的内容: ,

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: , ..., [9]

删除的内容: , ..., [10]

删除的内容: , ..., [11]

删除的内容:

删除的内容: [A]... [12]

删除的内容: , ..., [13]

删除的内容: ,

删除的内容: ,

删除的内容: , ..., [14]

删除的内容: , ..., [15]

删除的内容: , ..., [16]

删除的内容: [17]

删除的内容: , ..., [18]

删除的内容: , ... [19]

删除的内容: C

删除的内容: , ... [20]

删除的内容: , [21]

删除的内容: , ..., [22]

删除的内容: [23]

删除的内容: , ... [24]

删除的内容: ,

删除的内容: ,

... [25]

... [26]

页 1853:	[1] 删除的内容	n	2008-12-19 14:30:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[1] 删除的内容	n	2008-12-19 14:30:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[1] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[1] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[1] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[2] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[2] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[2] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[2] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[3] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[3] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[3] 删除的内容	n	2008-12-19 14:24:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[3] 删除的内容	n	2008-12-19 14:25:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[3] 删除的内容	n	2008-12-19 14:25:00
---------	-----------	---	---------------------

页 1853:	[4] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[4] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[4] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:57:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[5] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:58:00
---------	-----------	------	--------------------

.

页 1853:	[5] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:10:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[6] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

.

页 1853:	[6] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

].

页 1853:	[6] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[6] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[6] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

):

页 1853:	[7] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:10:00
---------	-----------	------	--------------------

页 1853:	[7] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:10:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[7] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:15:00
---------	-----------	------	--------------------

.

页 1853:	[7] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:58:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[7] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:58:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

.

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

].

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

,

页 1853:	[8] 删除的内容	n	2008-12-19 14:27:00
---------	-----------	---	---------------------

):

页 1853:	[9] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[9] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:11:00
---------	-----------	------	--------------------

.

页 1853:	[9] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[9] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	-----------	------	--------------------

,

页 1853:	[10] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:54:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[10] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:54:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[11] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[11] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[12] 删除的内容	gao	2008-12-19 17:24:00
---------	------------	-----	---------------------

[A]

页 1853:	[12] 删除的内容	gao	2008-12-19 17:25:00
---------	------------	-----	---------------------

[C]

页 1853:	[13] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:59:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[13] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:00:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[13] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:00:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

.

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

].

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[14] 删除的内容	n	2008-12-19 14:22:00
---------	------------	---	---------------------

):

页 1853:	[15] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:00:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[15] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:14:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[15] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:00:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[16] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[16] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[16] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[16] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[16] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[17] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

.

页 1853:	[17] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

].

页 1853:	[17] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

:

页 1853:	[18] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[18] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[18] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:55:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[19] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[19] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[19] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[20] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[20] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

.

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

].

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:28:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:29:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[21] 删除的内容	n	2008-12-19 14:29:00
---------	------------	---	---------------------

).

页 1853:	[22] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:56:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[22] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:56:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[23] 删除的内容	n	2008-12-19 14:29:00
---------	------------	---	---------------------

.

页 1853:	[23] 删除的内容	n	2008-12-19 14:29:00
---------	------------	---	---------------------

].

页 1853:	[23] 删除的内容	n	2008-12-19 14:23:00
---------	------------	---	---------------------

,

页 1853:	[24] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[24] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[24] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 9:12:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[25] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:56:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[25] 删除的内容	微软用户	2008-12-22 8:56:00
---------	------------	------	--------------------

,

页 1853:	[26] 删除的内容	gao	2008-12-19 17:21:00
---------	------------	-----	---------------------

C

页 1853:	[26] 删除的内容	gao	2008-12-19 17:29:00
---------	------------	-----	---------------------

—